

密级: _____



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

基于深度学习的医学图像处理关键技术研究

作者姓名: _____ 陶攀

指导教师: _____ 付忠良 研究员

中国科学院成都计算机应用研究所

学位类别: _____ 工学博士

学科专业: _____ 计算机软件与理论

培养单位: _____ 中国科学院成都计算机应用研究所

2017 年 12 月

Research on Key Technologies in Medical Image Processing

Based on Deep Learning

by
Pan Tao

A thesis submitted to
The University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirements
for the degree of
PhD of Computer Software and Theory

Chengdu Institute of Computer Applications
Chinese Academy of Sciences

December, 2017

学位论文独创性声明

本人郑重声明：我所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及所取得的研究成果。尽我所知，除了文中已经标注引用的内容外，本论文中不含其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明或致谢。本人知道本声明的法律结果由自己承担。

作者签名：_____ 日期：_____

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解中国科学院成都计算机应用研究所有关保留、使用学位论文的规定，即：中国科学院成都计算机应用研究所有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

作者签名：_____ 导师签名：_____ 日期：_____

摘 要

关键词： 中国科学院大学，学位论文， \LaTeX 模板

Abstract

This paper is a help documentation for the \LaTeX class ucasthesis, which is a thesis template for the University of Chinese Academy of Sciences. The main content is about how to use the ucasthesis, as well as how to write thesis efficiently by using \LaTeX .

Keywords: University of Chinese Academy of Sciences (UCAS), Thesis, \LaTeX Template

目 录

摘 要	vii
Abstract	ix
目 录	xi
图形列表	xiii
表格列表	xv
符号列表	xvii
第一章 绪论	1
1.1 研究背景及现实意义	1
1.2 研究现状及难点	1
1.3 全文结构及创新点	1
1.4 本章小结	1
第二章 图像预处理	3
2.1 引言	3
2.2 相关工作	3
2.3 提出方法	3
2.4 实验结果和分析	3
2.5 本章小结	3
第三章 超声心动图切面的识别方法	5
3.1 引言	5
3.2 卷积神经网络	5
3.3 Deep-Echo 模型	5
3.4 实验结果和分析	5
3.5 本章小结	5

第四章 空间金字塔分解的深度可视化方法	7
4.1 引言	7
4.2 梯度更新的可视化方法	7
4.3 空间金字塔分解	7
4.4 实验结果分析和讨论	7
4.5 本章小结	7
第五章 医学计算机辅助检测方法	9
5.1 引言	9
5.2 区域卷积神经网络概览	9
5.3 候选区域生成网络及其改进	9
5.4 实验结果分析和讨论	9
5.5 本章小结	9
第六章 医学图像的分割方法	11
6.1 引言	11
6.2 初始位置定位和特征点标注	11
6.3 AAM 模型和 CLM 模型	11
6.4 结合卷积网络特征的形状对齐模型	11
6.5 实验结果分析和讨论	11
6.6 本章小结	11
第七章 总结与展望	13
参考文献	15
攻读学位期间发表的学术论文与科研成果	17
致 谢	21

图形列表

表格列表

符号列表

Characters

Symbol	Description	Unit
R	the gas constant	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
C_v	specific heat capacity at constant volume	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
C_p	specific heat capacity at constant pressure	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
E	specific total energy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
e	specific internal energy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
h_T	specific total enthalpy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
h	specific enthalpy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
k	thermal conductivity	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
T	temperature	K
t	time	s
p	thermodynamic pressure	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
\hat{p}	hydrostatic pressure	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
\mathbf{f}_b	body force	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$
S	boundary surface	m^2
V	volume	m^3
\mathbf{V}	velocity vector	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
u	x component of velocity	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
v	y component of velocity	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
w	z component of velocity	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
c	speed of sound	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
\mathbf{r}	position vector	m
\mathbf{n}	unit normal vector	1
$\hat{\mathbf{t}}$	unit tangent vector	1
$\tilde{\mathbf{t}}$	unit bitangent vector	1
C_R	coefficient of restitution	1
Re	Reynolds number	1
Pr	Prandtl number	1

Ma	Mach number	1
α	thermal diffusivity	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
μ	dynamic viscosity	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
ν	kinematic viscosity	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
γ	heat capacity ratio	1
ρ	density	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
σ_{ij}	stress tensor	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
S_{ij}	deviatoric stress tensor	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
τ_{ij}	viscous stress tensor	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
δ_{ij}	Kronecker tensor	1
I_{ij}	identity tensor	1

Operators

Symbol	Description
Δ	difference
∇	gradient operator
δ^\pm	upwind-biased interpolation scheme

Abbreviations

Acronym	Description
ANFO	Ammonium Nitrate Fuel Oil
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy
CJ	Chapman-Jouguet
EOS	Equation of State
JWL	Jones-Wilkins-Lee
TVD	Total Variation Diminishing
WENO	Weighted Essentially Non-oscillatory
ZND	Zel'dovich-von Neumann-Doering

第一章 绪论

1.1 研究背景及现实意义

1.2 研究现状及难点

1.3 全文结构及创新点

1.4 本章小结

第二章 图像预处理

我们提出了一个完全卷积编码器 - 解码器框架的图像残差变换任务。所提出的框架不是仅使用每像素丢失函数，而是结合依赖于来自预先训练的网络的低级特征的感知损失函数来学习端到端映射。通过引入身份映射指出映射函数以处理无噪声图像。并通过分析神经网络与他们试图学习的基本噪声分布之间的相互作用。我们还展示了如何构建一个统一的变换，然后使用这个统一的变换使单个深度神经网络能够在不同的噪声级别上正常工作。与以前的方法相比，我们的性能更好。实验结果表明了该算法处理图像去噪任务的有效性。

2.1 引言

2.2 相关工作

2.3 提出方法

2.3.1 全卷积网络

2.4 实验结果和分析

2.5 本章小结

第三章 超声心动图切面的识别方法

提出了一种基于深度卷积神经网络自动识别超声心动图标准切面的方法，并可视化分析了深度模型的有效性。该算法针对网络全连接层占有模型大部分参数的缺点，引入空间金字塔均值池化替代全连接层，获得更多的空间结构信息，并大大减少模型参数、降低过拟合风险，通过类别显著性区域将类似注意力机制引入模型可视化过程。通过超声心动图标准切面的识别问题案例，试着对深度卷积神经网络模型的鲁棒性和有效性进行了解释。在超声心动图上的可视化分析实验表明，通过改进方法的深度模型的识别决策依据，同医师辨别分类超声心动图标准切面的依据一致，表明了方法的有效性和实用性。

3.1 引言

3.2 卷积神经网络

3.3 Deep-Echo 模型

3.3.1 全卷积网络

3.4 实验结果和分析

3.5 本章小结

第四章 空间金字塔分解的深度可视化方法

提出了一种基于深度卷积神经网络自动识别超声心动图标准切面的方法，并可视化分析了深度模型的有效性。该算法针对网络全连接层占有模型大部分参数的缺点，引入空间金字塔均值池化替代全连接层，获得更多的空间结构信息，并大大减少模型参数、降低过拟合风险，通过类别显著性区域将类似注意力机制引入模型可视化过程。通过超声心动图标准切面的识别问题案例，试着对深度卷积神经网络模型的鲁棒性和有效性进行了解释。在超声心动图上的可视化分析实验表明，通过改进方法的深度模型的识别决策依据，同医师辨别分类超声心动图标准切面的依据一致，表明了方法的有效性和实用性。

4.1 引言

4.2 梯度更新的可视化方法

4.3 空间金字塔分解

4.3.1 高斯和拉普拉斯金字塔分解

4.3.2 梯度归一化

4.4 实验结果分析和讨论

4.5 本章小结

本文针对理解深度CNN特征空间存在的问题，提出一种用于改善深度CNN分类模型的可视化方法。其中通过改善激活最大化可视化技术来产生更具有全局结构的细节、上下文信息和更自然的颜色分布的高质量图像。该方法首先对反向传播的梯度进行归一化操作，在常用正则化技术的基础上，提出使用空间金字塔分解图像不同频谱信息；为限制可视化区域，提出利用类别显著激活图技术，可以减少优化产生重复对象碎片的倾向，而倾向于产生单个中心对象以改进可视化效果。激活最大化可显示CNN在分类时关注什么。这种改进的深度可视化技术将增加我们对深层神经网络的理解，进一步提高创造更强大的深度学习算法的能力。该方法适用于基于梯度更新的可视化领域，是对网络模型整体的理解，具体各层特征怎么耦合成语义信息仍需进一步探索，深度CNN模型如何重建一个完整的类别概念，仍是一个开放性问题。

第五章 医学计算机辅助检测方法

提出了一种基于深度卷积神经网络自动识别超声心动图标准切面的方法，并可视化分析了深度模型的有效性。该算法针对网络全连接层占有模型大部分参数的缺点，引入空间金字塔均值池化替代全连接层，获得更多的空间结构信息，并大大减少模型参数、降低过拟合风险，通过类别显著性区域将类似注意力机制引入模型可视化过程。通过超声心动图标准切面的识别问题案例，试着对深度卷积神经网络模型的鲁棒性和有效性进行了解释。在超声心动图上的可视化分析实验表明，通过改进方法的深度模型的识别决策依据，同医师辨别分类超声心动图标准切面的依据一致，表明了方法的有效性和实用性。

5.1 引言

5.2 区域卷积神经网络概览

5.3 候选区域生成网络及其改进

5.3.1 候选区域生成网络模型结构

5.3.2 仿射变换候选框

5.4 实验结果分析和讨论

5.5 本章小结

本文利用深度学习来解决医学图像计算机辅助检测问题，设计并验证了自动检测 MRI 短轴和超声心动图中 LV 长轴切面的方法，在通用物体检测 Faster RCNN 框架的基础上，针对 RPN 引入空间变换，结合带朝向损失的多任务损失，探索解决图像平面内物体旋转角度检测的问题，并利用困难样例挖掘策略加快迭代训练。在公共 MRI 数据集和自主收集的超声心动图数据上进行详尽实验验证，在多个评估指标方面提供更好的测试结果，但该方法仍耗费较多的标注数据，探索需要更少标注数据的检测算法是将来的工作目标。

第六章 医学图像的分割方法

提出了一种基于深度卷积神经网络自动识别超声心动图标准切面的方法，并可视化分析了深度模型的有效性。该算法针对网络全连接层占有模型大部分参数的缺点，引入空间金字塔均值池化替代全连接层，获得更多的空间结构信息，并大大减少模型参数、降低过拟合风险，通过类别显著性区域将类似注意力机制引入模型可视化过程。通过超声心动图标准切面的识别问题案例，试着对深度卷积神经网络模型的鲁棒性和有效性进行了解释。在超声心动图上的可视化分析实验表明，通过改进方法的深度模型的识别决策依据，同医师辨别分类超声心动图标准切面的依据一致，表明了方法的有效性和实用性。

6.1 引言

6.2 初始位置定位和特征点标注

6.3 AAM 模型和 CLM 模型

6.4 结合卷积网络特征的形状对齐模型

6.4.1 超声组织特征纹理特异性灰度归一化

6.4.2 结合不同外观特征的全局 AAM

6.5 实验结果分析和讨论

6.6 本章小结

本文利用深度学习来解决医学图像计算机辅助检测问题，设计并验证了自动检测 MRI 短轴和超声心动图中 LV 长轴切面的方法，在通用物体检测 Faster RCNN 框架的基础上，针对 RPN 引入空间变换，结合带朝向损失的多任务损失，探索解决图像平面内物体旋转角度检测的问题，并利用困难样例挖掘策略加快迭代训练。在公共 MRI 数据集和自主收集的超声心动图数据上进行详尽实验验证，在多个评估指标方面提供更好的测试结果，但该方法仍耗费较多的标注数据，探索需要更少标注数据的检测算法是将来的工作目标。

第七章 总结与展望

参考文献

- [1] 陶攀, 付忠良, 朱锴 . 基于深度学习的超声心动图切面识别方法[J/OL]. 计算机应用, 2017, 37(5): 1434–1438. <http://www.joca.cn/CN/10.11772/j.issn.1001-9081.2017.05.1434>. DOI: 10.11772/j.issn.1001-9081.2017.05.1434.
- [2] 陶攀, 付忠良 . 空间金字塔分解的深度可视化方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(11): 8–13. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6254.201612087.
- [3] 纪祥虎, 高斯聪, 陶攀, 等. 用于统计形状模型的特征点辅助标注方法[EB/OL]. 中科院成都信息技术股份有限公司, 2015. <https://www.google.com/patents/CN105205827A?cl=zh>.
- [4] PAN T, ZHONGLIANG F, LILI W, et al. Perceptual Loss with Fully Convolutional for Image Residual Denoising[M/OL]//TAN T, LI X, CHEN X, et al. Pattern Recognition. Springer Singapore, 2016: 122–132. http://link.springer.com/10.1007/978-981-10-3005-5_11. DOI: 10.1007/978-981-10-3005-5_11.

攻读学位期间发表的学术论文与科研成果

已发表论文

1. **Pan Tao**, Zhongliang Fu, Lili Wang, Kai Zhu. Perceptual Loss with Fully Convolutional for Image Residual Denoising. *Pattern Recognition*. **CCPR(EI)**. 2016. 122–132, DOI:10.1007/978-981-10-3005-5-11
2. 陶攀, 付忠良, 朱锴, 王莉莉. 金字塔分解的深度可视化方法, 哈尔滨工业大学学报 (EI), 2017, 49(11):60-65, DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201612087
3. 陶攀, 付忠良, 朱锴, 王莉莉. 基于深度学习的超声心动图切面识别方法研究, 计算机应用 (中文核心), 2017. DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2017.05.1434
4. Xianghu Ji, Lili Wang, **Pan Tao**, Zhongliang Fu. Landmark Selecting on 2D Shapes for Constructing Point Distribution Model., *Pattern Recognition*, **CCPR(EI)** 2016, 318–331. DOI:10.1007/978-981-10-3002-4-27
5. Lili Wang, Zhongliang Fu, **Pan Tao**. Four-chamber plane detection in cardiac ultrasound images based on improved imbalanced AdaBoost algorithm, *IEEE, ICCCBDA(EI)* 2016, 299–303. DOI:10.1109/ICCCBDA.2016.7529574

国家发明专利

1. 纪祥虎, 高思聪, 陶攀, 王莉莉. 用于统计形状模型的特征点辅助标注方法. (申请号:201510672503.8) 专利公开号:CN105205827 A.2015

项目经历

1. 2015–2016 四川省科技创新苗子工程——基于自动分割技术的左心室可视化及功能评价临床教学平台 (编号: 2015060)
项目描述: 本项目主要目标在于使用机器学习方法对左心室进行分割, 得到左心室轮廓及结构和心功能参数; 使用可视化技术对心脏左室进行三维立体结构教学。帮助麻醉医生学员快速学习掌握超声心动图中左心室结构
项目职责: 在项目中主要负责超声图像中心脏器官的自动定位和分割, 分别利用机器学习的方法对超声图像中的左心室定位, 和 AAM 方法对肾脏进行分割。

项目成果：形成论文两篇，专利一项，期间主要研究了基于深度学习的图像预处理方法，基于形状对齐模型进行心室分割，及基于深度级联回归模型进行心室边界分割算法等

2. 2015-2015 阿里巴巴大规模图像搜索赛（38 名共 843 支参赛队伍）

本项目目标是从海量图像中检索最相同或似的 Top20 图像

主要负责使用深度学习模型对图像进行特征抽取，同时配合队友进行图像检索等其他工作，其中用时一个月根据 matconvnet 写了一个 C++ 版本的 CNN 框架的 API，从中获得了处理百万级数据的经验，获得了使用 OpenBLAS 处理大型矩阵运算的经验

项目收获：形成论文一篇，熟悉了深度学习提取语义特征进行实例检索的各项关键技术

3. 2015-2017 四川科技支撑计划—医学图像挖掘与心脏智能诊疗系统关键技术研究

项目描述：本项目主要目标在于使用机器学习方法对超声心动图标准切面进行自动识别。超声图像标准切面分类模块，包括图像预处理、特征提取和分类器模型构建实现标准切面自动识别分类；基于云端的海量切面视频的语义检索模块等

项目职责：项目参与人

任务分工：图像预处理、特征提取、分类器建模、视频语义检索

项目成果：发表论文三篇，分别研究了基于深度学习理论可视化分析其有效性，基于深度特征的超声图像标准切面自动识别算法等

4. 2013-2014 四川省科技支撑项目，华西医院合作项目-医学可视化模拟教学和诊断系统

项目描述：项目旨在为无经验的心脏外科医生和学员提供可视化的教学方案，同时通过机器学习和图形图像处理对三维心脏进行开放式建模，以提出一种基于心脏开放模型的智能诊疗综合系统

项目职责：在项目中负责超声图像处理和基于机器学习的病理挖掘工作。

任务分工：图像预处理

项目成果：参与撰写专利两项，对超声仪器，心脏疾病临床基本知识有较全面的了解；设计了针对心脏超声图像的分割识别方法，以及病理挖掘方法；学习了基于偏微分方程的图像去噪和基于水平集的分割方法

在审和 Working 论文

1. 陶攀，付忠良. 基于 Fast-rcnn 的医学实例检索方法研究，Working，2015

2. 陶攀, 付忠良. 基于超声心动图的左心室分割综述, Working, 2015
3. 陶攀, 付忠良. 基于深度学习的医学计算机辅助检测算法, 在审, 生物医学工程学杂志 (EI), 2016
4. 陶攀, 付忠良. 基于形状对齐的超声心动图左心室分割方法, Working, 2016
5. 陶攀, 付忠良. 基于 CNN-LSTM 的超声心动图左心室分割方法, Working, 2017

参与项目编写和申请

1. 2016 四川科技支撑计划-医学图像挖掘与心脏智能诊疗系统关键技术研究
2. 2016 基于医学图像建模的心功能评价系统研发与应用
3. 2015 国科控股技术创新项目-交互式视觉仿真关键技术研究及产品应用示范
4. 2014 西部之光项目-基于医学图像建模的评价系统
5. 2014 数字化医疗辅助设备关键技术研发—基于机器智能的三维可视化手术诊疗仿真平台

获奖及荣誉

1. 2015 获得中国科学院研究生院“三好学生”荣誉称号
2. 2016 中国科学院大学优秀学生干部
3. 2017 中科院博士国家奖学金

致 谢

值此论文完成之际，谨在此向多年来给予我关心和帮助的老师、学长、同学、朋友和家人表示衷心的感谢！

没有 `ctex package` 的众多前辈的辛勤付出和 `CASthesis package` 作者吴凌云学长的贡献， \LaTeX 菜鸟的我是无法完成此学位论文模板的。在 \LaTeX 中的一滴的成长源于开源社区的众多资料和教程，在此对所有前辈们的付出表示感谢！

.....

谨把本文献给我最敬爱的父亲！